جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره دوازدهم، زمستان ۱۳۹۳

صص ۱۸-۱

پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سیاهرود)

فریبا اسفندیاری درآباد- دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
ابراهیم بهشتی جاوید- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران[1]
محمدحسین فتحی- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۷/۳۰ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۳/۱۲

چکیده

در این پژوهش با استفاده از زمین‌لغزش‌های ثبت‌شده در منطقه و ۱۱ پارامتر طبیعی (سنگ-شناسی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، شاخص حمل رسوب (STI)، شاخص توان آبراهه (SPI)، بارش، شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)، درجه شیب، جهت شیب، کاربری زمین و تراکم پوشش گیاهی (NDVI) نقشه حساسیت زمین‌لغزش برای حوضه سیاهرود استان گیلان تهیه گردیده است. جهت انجام این کار از تئوری بیزین استفاده‌شده است. با استفاده از احتمالات تئوری بیزین ارتباط بین پارامترها و مناطق لغزشی (دو سوم مناطق لغزشی) تعیین شد و وزن هر طبقه از پارامترها به دست آمد. اجرای مدل و اعمال وزن لایه‌ها با استفاده از نرم‌افزار Arcmap صورت گرفت و درنهایت نقشه حساسیت زمین لغزش در پنج کلاس حساسیت به دست آمد. با توجه به نقشه به‌دست‌آمده و نیز وزن کلاس‌های هر یک از پارامترها، کلاس تراس‌های آبرفتی قدیمی و مخروط‌افکنه‌های مرتفع در لایه سازند، مرتع متوسط در بین کلاس‌های کاربری زمین، جهات شمالی و شمال غربی، شیب‌های ۲۰-۵ درجه و نیز فاصله ۱۰۰-۰ متر از رودخانه بیشترین وزن و تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش‌های منطقه دارند. دقت نقشه حساسیت زمین‌لغزش با استفاده از یک سوم (۳۰ نقطه لغزشی) مناطق لغزشی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتیجه ارزیابی نشان داد که مدل با قابلیت پیش‌بینی ۸۳/۳ درصد زمین‌لغزش‌ها در کلاس خطر زیاد و خیلی زیاد، دقت قابل قبولی در ارزیابی و تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش دارد.

کلیدواژه‌ها: **حساسیت** زمین‌لغزش، تئوری بیزین، سیاهرود، وزن شواهد.

---

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۴۷۰۴۸۹۶۲ Email:eb.beheshti@yahoo.com

۱. مقدمه

زمین‌لغزش ازجمله مهم‌ترین مخاطرات زمینی در جهان است. زمین‌لغزش‌ها زندگی انسان‌ها را با تخریب محیط، منابع و دارایی آن‌ها با خطر جدی روبه‌رو می‌کنند (سان وی هی[1] و همکاران، ۲۰۱۲:۳۰). در مقایسه با انواع مخاطرات طبیعی همچون آتشفشان و سیل، زمین‌لغزش‌ها آسیب‌های قابل‌توجهی را از نظر مالی و جانی ایجاد می‌کنند (گوزتی[2] ۲۰۰۵: ٤۰۸). بر اساس برآوردهای اولیه در ایران سالانه حدود ۵۰۰ میلیارد ریال خسارت مالی از طریق وقوع زمین‌لغزش وارد می‌شود (حسین زاده و دیگران،۱۳۸۸:۲۷). تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش و ارزیابی شدت خطر آن می‌تواند کمک شایانی در زمینه مدیریت محیط و اتخاذ تصمیمات درست در مقابله با این مخاطره باشد.

به‌طورکلی پژوهش‌های موجود در رابطه با ارزیابی خطر زمین‌لغزش را از لحاظ رویکرد روش‌شناسی می‌توان در سه گروه غالب کمی، کیفی و نگرش هوش مصنوعی[3] (AI) دسته‌بندی کرد. به‌طورکلی نگرش‌های کیفی بر مبنای داوری‌های ذهنی یک یا گروهی از متخصصین صورت می‌گیرد. این در حالی است که نگرش‌های کمی بر مبنای قوانین سخت ریاضی صرف‌نظر از هرگونه سوگیری شخصی بنا شده‌اند. تکنیک‌های هوش مصنوعی می‌توانند از دانش ذهنی یا تکنیک تطبیق الگو در مقابل حل مجموعه‌ای از معادلات ریاضی استفاده کنند. تکنیک‌های هوش مصنوعی به‌طور وسیعی شبکه عصبی مصنوعی (ANN)[4]، سیستم خبره[5] و دیگر تکنیک‌های دانش پایه و قانون پایه را پوشش می‌دهند (نئوپان[6] و پیانتاناکونچایی[7]، ۲۰۰٦: ۲۸۱). با توجه به مطالب فوق و پژوهش‌های صورت گرفته برای تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش می‌توان از مدل‌هایی مثل رگرسیون لجستیک[8]، فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)[9]، فرآیند تحلیل شبکه (ANP)، شبکه عصبی مصنوعی، انواع مدل‌های دومتغیره آماری، مدل LNRF، مدل منطق فازی و غیره استفاده کرد. معمولاً انتخاب مناسب‌ترین نگرش و مدل بر اساس نوع داده‌ها، مقیاس منطقه موردمطالعه و مقیاس تحلیل‌ها صورت می‌گیرد و بستگی به دانش پژوهشگر دارد. ازجمله کارهایی که در داخل و خارج کشور در زمینه مدل و موضوع پژوهش انجام شده می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

---

1 Sanwei He
2 Guzzetti
3 Artificial Intelligence
4 Artificial neural network
5 Expert system
6 Neaupane
7 Piantanakulchai
8 logisticregression
9 Analytical Hierarchical Process

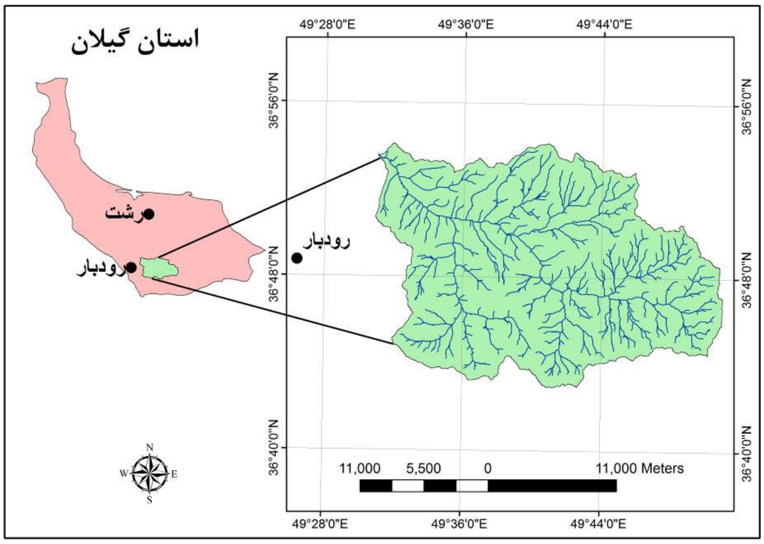
متو[1] و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از تئوری بیز پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش را در بخشی از هند انجام دادند. در این پژوهش از ۱۵ عامل طبیعی و انسانی جهت پهنه‌بندی استفاده شد. ارزیابی نقشه نهایی نشان داد که دقت نقشه تهیه شده۸٤/٦ ٪ و قابل قبول است. پیاسنتینیا[2] و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از مدل تئوری بیزین پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش را برای جنوب منطقه تیرول[3] در کشور ایتالیا انجام دادند. نتایج پژوهش نشان داد که نقشه حساسیت زمین‌لغزش برای پیش‌بینی زمین‌لغزش‌ها با درصد بالایی (۷۵ ٪) قابل‌اطمینان است؛ بنابراین مدل فوق می‌تواند به خاطر ثمربخش و کم‌هزینه بودن برای برنامه‌ریزان و تصمیم-گیران محیطی مدلی سودمند و قابل‌اطمینان باشد. محمدی و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از سه مدل بیز، دمپستر–شفر[4] و نسبت تکرار[5] در بخشی از استان گلستان حساسیت زمین‌لغزش را پهنه‌بندی کردند. در این پژوهش برای ارزیابی مدل‌ها از منحنی ROC استفاده شد و طبق این ارزیابی مدل نسبت تکرار بهترین نتیجه را (۷۵ ٪ دقت) در بین سه مدل فوق داشت. نیازی و همکاران (۱۳۸۹) حوضه سد ایلام را با استفاده از مدل آماری دومتغیره پهنه‌بندی کردند. نتایج کار نشان داد که روش تراکم سطح، وزن متغیرها (تئوری بیز) و ارزش اطلاعاتی به ترتیب بیش‌ترین دقت را در تفکیک کلاس‌های خطر زمین‌لغزش داشته‌اند. پورقاسمی و همکاران (۱۳۹۱) با استفاده از تئوری بیزین و ١٤ عامل طبیعی و انسانی پهنه‌بندی زمین‌لغزش را برای بخشی از استان گلستان انجام دادند. ارزیابی مدل و نتایج تحقیق نشان داد که دقت مدل احتمالاتی تهیه‌شده با رویکرد دوم مدل‌سازی (حذف عامل جهت شیب از تحلیل‌ها) در منطقه موردمطالعه ۷۱/۳۷ درصد و خوب برآورد شده است. از دیگر کارهای صورت گرفته در زمینه زمین‌لغزش می‌توان به پژوهش امیر احمدی و همکاران (۱۳۸۹)، قرهی و همکاران (۱۳۹۰) و یمانی و همکاران (۱۳۹۱) اشاره کرد.

۲. منطقه موردمطالعه

محدوده موردمطالعه حوضه رودخانه سیاهرود از زیرشاخه‌های سفیدرود در استان گیلان است (شکل ۱). این حوضه در پایین‌دست سد منجیل قرار گرفته و مساحتی در حدود ٤۳۷ کیلومترمربع را در برمی‌گیرد. ارتفاع حوضه بین ۱۳۲ تا ۲۷۰۰ متر از سطح دریا در نوسان است. بیشترین شیب حوضه برابر با ۷۲ درجه است. از نظر کاربری و پوشش زمین، بیش از ۵۰ درصد حوضه دارای کاربری از نوع مرتع متوسط و جنگل متراکم (بیشتر در ارتفاعات میانی حوضه) می‌باشد. از نظر جنس سازندها نیز غلبه با سازندهایی از جنس توف‌های داسیتی – آندزیتی با میان لایه‌هایی از گدازه (۳۸٪ منطقه) است. سازندهایی مثل شیل و ماسه،

1 Mathew
2 Piacentinia
3 Tyrol
4 Dempster – Shafer
5 Frequency ratio

تراس‌های آبرفتی قدیمی و مخروط‌افکنه‌ها و سازندهایی از جنس تناوب ماسه‌سنگ، آهک و مارن و کنگلومرا نیز از دیگر سازندهای منطقه می‌باشند. در این منطقه با توجه به نوع سازندها، عمق زیاد رسوبات در دامنه‌ها و میانگین بارش بالا، زمین‌لغزش‌های زیادی اتفاق می‌افتد. در این پژوهش با استفاده از تئوری احتمالات بیز، نقشه حساسیت زمین‌لغزش حوضه فوق مطالعه و تهیه‌شده است.



شکل ۱ موقعیت حوضه سیاهرود در استان گیلان

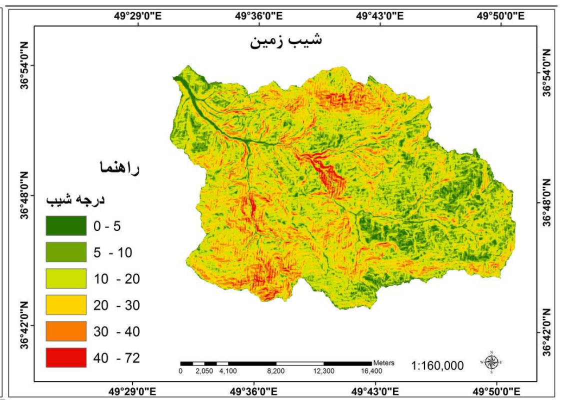
۳. مواد و روش‌ها

۳,۱. داده‌ها

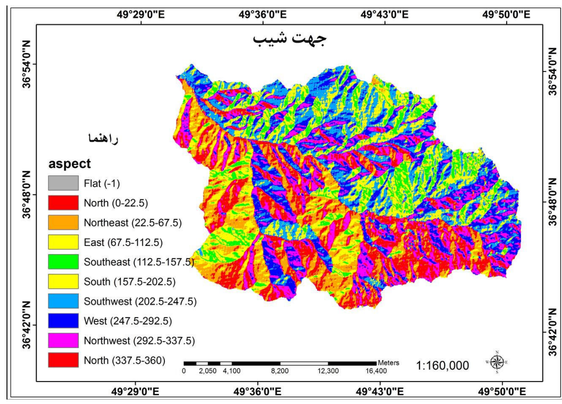
برای اجرای مدل و تهیه نقشه حساسیت زمین‌لغزش، جمع‌آوری و تهیه پایگاه داده از عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش از مهم‌ترین مراحل تحقیق است. در این پژوهش با استفاده از ۱۱ پارامتر (سنگ‌شناسی، فاصله از گسل، فاصله از رودخانه، بارش، شیب زمین، جهت شیب، کاربری زمین، تراکم پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص حمل رسوب[1] (STI)، شاخص توان آبراهه[2] (SPI) و شاخص رطوبت توپوگرافیک[3] (TWI)) عمل پهنه‌بندی زمین‌لغزش انجام شده است. در اولین گام از این مرحله با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی منطقه لایه مدل ارتفاعی منطقه (DEM) با اندازه پیکسل ۳۰ متری تهیه شد. با داشتن این لایه با استفاده از عملگرهای مختلف موجود در بسته نرم‌افزاری جی ای اس لایه‌هایی همچون شیب (شکل۲)، جهت شیب (شکل ۳) و شبکه زهکشی که به‌صورت فاصله از رودخانه (شکل ٤) در مدل استفاده‌شده است، استخراج شدند.

1 Sediment Transport Index
2 Stream Power Index
3 topographic wetness index

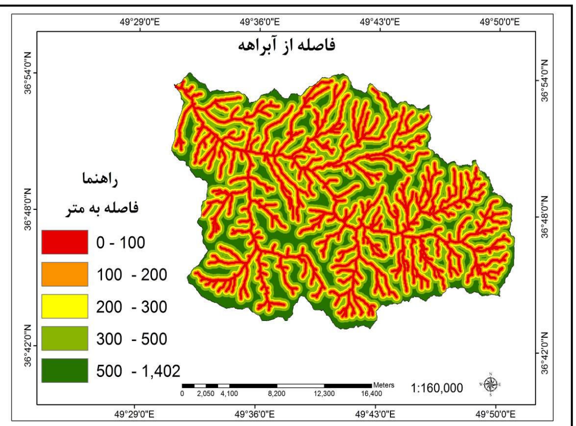
زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای (IRS) و گوگل ارث[1] برای مدل‌سازی استخراج شدند (۹۰ زمین‌لغزش). از بین این زمین‌لغزش‌ها دو سوم (۶۰ زمین‌لغزش) برای اجرای مدل و پیدا کردن وزن کلاس‌ها و یک سوم (۳۰ زمین‌لغزش) مابقی برای ارزیابی مدل مورداستفاده قرار گرفت (شکل ۵). همچنین با استفاده از باندهای ۳ و ٤ تصاویر ماهواره لندست شاخص پوشش گیاهی (NDVI) حوضه تهیه شد (شکل ٦). برای تهیه نقشه کاربری اراضی محدوده موردمطالعه از محیط نرم‌افزار پردازش تصویر ENVIو روش طبقه‌بندی نظارت‌شده (الگوریتم حداکثر مشابهت[2] (MLC)) و نیز تصویر رنگی ماهواره لندست استفاده‌شده است (شکل ۷). همچنین با استفاده از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ جیرنده لایه جنس سازندها (شکل ۸) و لایه گسل به‌صورت فاصله از گسل‌ها (شکل ۹) تهیه شد. درنهایت برای به دست آوردن لایه پهنه‌های بارشی حوضه از آمار ایستگاه‌های هواشناسی منطقه استفاده شد و لایه بارش به‌صورت پهنه‌های بارشی به دست آمد (شکل ۱۰).



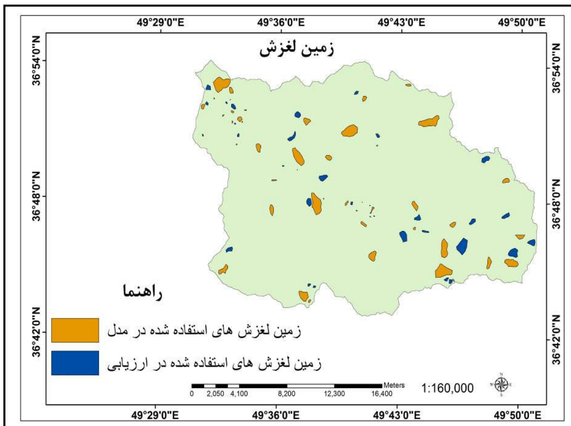
شکل ۲ نقشه شیب



شکل ۳ نقشه جهت شیب

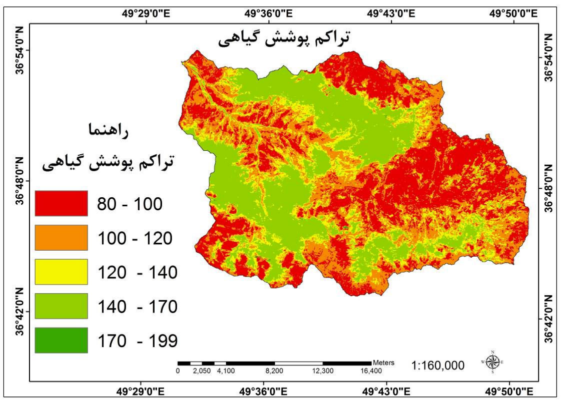


شکل ٤ نقشه فاصله از رودخانه

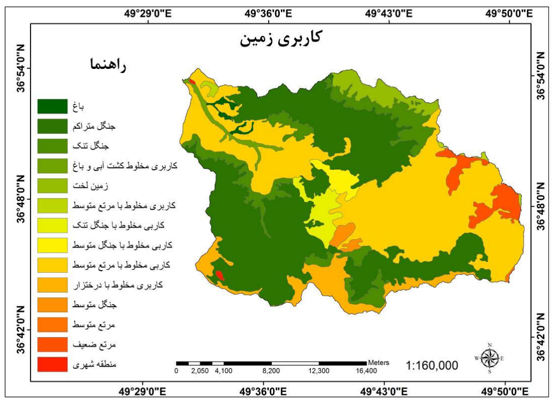


شکل ۵ نقشه زمین‌لغزه‌های منطقه

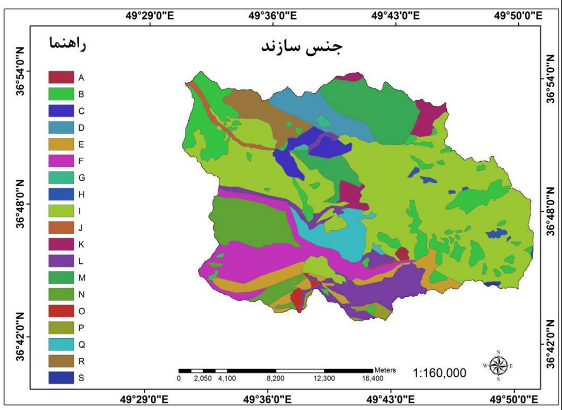
1 Google Earth
2 Maximum likelihood classifier



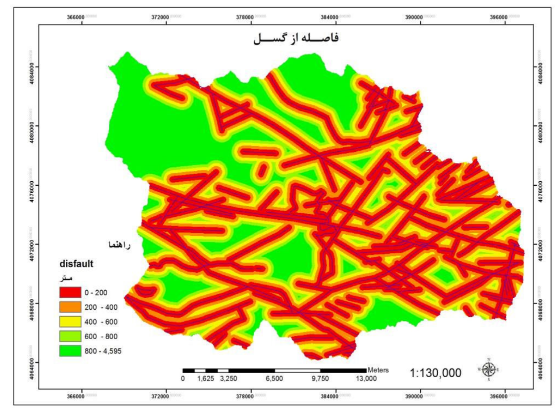
شکل ٦ نقشه تراکم پوشش گیاهی



شکل ۷ نقشه کاربری زمین



شکل ۸ نقشه فاصله از گسل



شکل**۹** نقشه جنس سازند

(A: اولیوین گابرو- نوریت B: تراس‌های آبرفتی قدیمی و مخروط‌افکنه‌های مرتفع C: تناوب توف داسیتی- اندزیتی با میان لایه‌ای از ماسه‌سنگ و کنگلومرا به رنگ قرمز تیره D: تناوب سنگ آهک، مارن، ماسه‌سنگ و آهک ماسه‌ای، نازک تا متوسط لایه E: تناوب کوارتزیت ماسه‌سنگ، سیلتستون و گلسنگ، با میان لایه‌ای از سنگ آهکF: تناوبی از شیل و ماسه‌سنگ، با میان لایه کنگلومرا، سنگ آتشفشانی و عدسی‌های زغالی G: توده‌های نیمه آتشفشانی اندریت-بازالت H: توده‌های نیمه آتشفشانی آندزیت-بازالتی I: توف‌های داسیتی آندزیتی قرمز و خاکستری تیره با میان لایه‌هایی از گدازه J : رسوبات رودخانه‌ای K: سنگ آهک فسیل دار خاکستری‌رنگ، ضخیم لایه تا توده‌ای به‌طور محلی چرتدار L: سنگ آهک، سنگ آهک توفی نازک لایه نومولیت‌دار به رنگ کرم و خاکستری M: سنگ آهک اوربیت و لین‌دار خاکستری متوسط لایه تا توده‌ای N: سنگ آهک متوسط تا ضخیم لایه به رنگ خاکستری، چرتدار با سنگ آهک o: کنگلومرا به رنگ قرمز، به‌صورت متوسط و منظم لایه P: گدازه‌های اندزیت بازالتی به رنگ خاکستری تیره Q: گدازه‌های اندزیتی- بازالتی با میان لایه‌ای از توف داسیتی، شیل و سنگ آهک ماسه‌ای R: گدازه‌های مگاپورفیریتیک حفره‌دار با ترکیب تراکی آندزیتی قهوه‌ای S: گنبد یا توده‌های کوچک مونزونیتی-تونالیتی)

شاخص قدرت آبراهه SPI

مور و همکاران (۱۹۹۱) معادله (۳) را برای محاسبه شاخص قدرت رودخانه (SPI) پیشنهاد کردند که در این معادله اندازه قدرت فرسایش جریان آب بر این فرض استوار است که عمل تخلیه متناسب با وسعت حوضه صورت می‌گیرد. به‌طورکلی این شاخص در نواحی که نیمرخ و مماسی[1] محدب دارند (مناطق همگرا و تند) فرسایش ویژه و در نواحی که نیمرخ مقعر دارند (مناطق با کاهش ظرفیت جریان) رسوب ویژه را پیش‌بینی می‌کند.

رابطه ۳

$$SPI = A_s . tan\beta$$

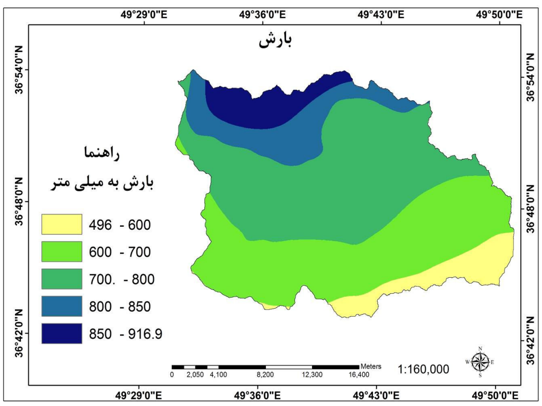
شاخص حمل رسوب STI

ازجمله شاخص‌های هیدرولوژیکی که در این مطالعه استفاده‌شده شاخص حمل رسوب است. این شاخص قدرت فرسایندگی جریان‌ها را در روی زمین نشان می‌دهد. رابطه تجربی (رابطه ۱) که برای به دست آوردن این شاخص وجود دارد شبیه معادله جهانی فرسایش خاک است؛ ازاین‌رو می‌تواند در نشان دادن موقعیت مناطق با خطر فرسایش مورداستفاده قرار گیرد (مور[2] و بورچ[3]، ۱۹۸۶).

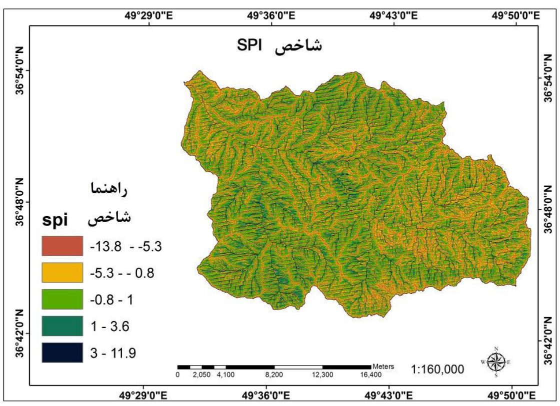
رابطه (۱)

$$STI = \left(\frac{A_s}{22.13}\right)^{0.62} \left(\frac{sin\beta}{0.0896}\right)^{1.3}$$

این پارامتر بر اساس مساحت حوضه (A_s) و سینوس گرادیان شیب ($sin\beta$) قابلیت حمل رسوب در حوضه را کنترل می‌کند. بر همین اساس ممکن است سیستم زهکشی را آشفته کند و دامنه‌هایی با گرادیان شیب کم به ایجاد زمین‌لغزش تمایل پیدا کنند (نفسلی اوغلو[4] و همکاران، ۲۰۰۸). شکل ۱۲ نقشه مربوط به این لایه را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ نقشه بارش



شکل ۱۱ نقشه شاخص قدرت آبراهه (SPI)

1 Tangential
2 Moore
3 Burch
4 Nefeslioglu

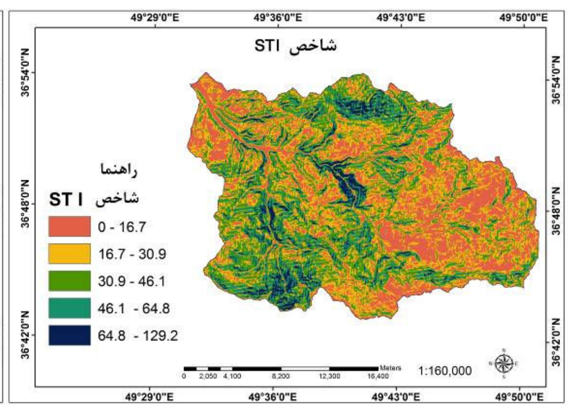
شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)

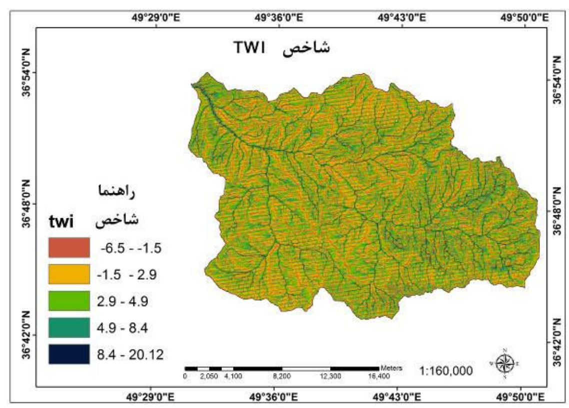
شاخص رطوبت توپوگرافیک (شاخص ترکیب توپوگرافیک[۱] (CTI) یا رطوبت خاک[۲]) که برای توصیف الگوی فضایی رطوبت خاک استفاده می‌شود (ویلسون[۳] و گالانت[٤]، ۲۰۰۰) به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$TWI = LN\left(\frac{A_s}{tan\beta}\right)$$

رابطه (۲)

این شاخص برای مطالعه حساسیت زمین‌لغزش استفاده می‌شود (گوروم و همکاران، ۲۰۰۸). از شاخص رطوبت توپوگرافیک می‌توان برای ارزیابی الگوی فضایی رطوبت خاک و تغییراتی که به دلیل فرسایش در بافت خاک رخ داده استفاده کرد (اسمیت[٥] و پرسون[٦]،۲۰۰۳. گربس[۷] و همکاران، ۲۰۰۷). این شاخص عموماً برای تعیین کنترل توپوگرافیک بر روی فرآیندهای هیدرولوژیکی استفاده می‌شود (سورنسون[۸] و همکاران، ۲۰۰٦) و مقادیر بالای TWIمعمولاً در بدنه زمین‌لغزش‌ها پیدا می‌شود (شکل ۱۳).





شکل۱۲ شاخص قدرت آبراهه (STI)

شکل ۱۳ شاخص رطوبت توپوگرافیک (TWI)

۳,۲. روش مطالعه

برای ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش در منطقه از روش وزن شواهد[۹] (کارتر[۱۰] و همکاران، ۱۹۸۹) استفاده‌شده است. این مدل به‌عنوان مدلی سودمند و آزمایش‌شده در زمینه‌های مختلف، همچون مطالعه

1 Compound Topographic Index
2 soil wetness
3 Wilson
4 Gallant
5 Schmidt
6 Persson
7 Grabs
8 Sorensen
9 weight of evidence (WofE)
10 Carter

حرکات توده‌ای، تحقیقات معدنی و نقشه‌کشی چشمه‌های آب زیرزمینی است (پولی[۱] و استرلاچینی[۲]، ۲۰۰۷. باربیری[۳] و کامبولی[٤]، ۲۰۰۹).

مدل وزن شواهد (WofE) یک روش آماری مبتنی بر تئوری احتمالات بیز است (دنیسون[٥] و همکاران، ۲۰۰۲) این مدل وابستگی موجود بین یک واقعه (زمین‌لغزش‌های رخ داده) و عامل‌های سببی (عوامل مستعد کننده زمین‌لغزش) را تخمین می‌زند. مدل فوق در سال ۱۹۸۸برای اکتشافات معدنی مورداستفاده قرار گرفت (کارتر و همکاران، ۱۹۸۸). متعاقباً در سال ۲۰۰۲ ون وسترن[٦] آن را برای ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش مورداستفاده قرارداد.

اگر ما عامل‌های سببی (عوامل مستعد کننده زمین‌لغزش) را B، کلاس‌های هر پارامتر را B_i و زمین‌لغزش رخ داده را S در نظر بگیریم، در این صورت تئوری بیز را برای محاسبه احتمال شرطی وقوع زمین‌لغزش (S) در کلاس معین (B_i)، می‌توان به‌صورت رابطه زیر به‌کار برد:

$$P(s|B_i) = \frac{P(B_i|s) \times P(s)}{P(B_i)}$$

رابطه ٤

در رابطه فوق $P(s)$احتمال اولیه وقوع پیشامد S در محدوده موردمطالعه (AS)، $P(B_i)$: احتمال وقوع کلاس B_iدر محدوده موردمطالعه (AS)،$P(B_i|s)$ احتمال وقوع پیشامد B_i به شرطی که پیشامد S اتفاق افتاده باشد $P(s|B_i)$: احتمال وقوع پیشامد S به شرطی که پیشامد B_i اتفاق افتاده باشد (پیاسنتینی[۷] و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۹۹).

احتمال شرطی وقوع زمین‌لغزش زمانی که کلاس B_i اتفاق نیفتاده باشد نیز به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$P(s|B_i^{\wedge}) = \frac{P(B_i^{\wedge}|s) \times P(s)}{P(B_i^{\wedge})}$$

رابطه ٥

در معادله فوق $P(s)$ احتمال اولیه وقوع پیشامد S در محدوده موردمطالعه (AS)، $P(B_i^{\wedge}|s)$ احتمال شرطی نبود کلاس B_i به شرطی که S اتفاق افتاده باشد، احتمال اولیه نبود کلاس B_i در محدوده موردمطالعه (AS). بخش‌های مختلف معادلات فوق را می‌توان به‌صورت روابط ٦ تا ۱۲محاسبه کرد (پیاسنتینی و همکاران، ۲۰۱۲: ۱۹۹).

1 Poli
2 Sterlacchini
3 Barbieri
4 Cambuli
5 Denison
6 Van Western
7 Piacentini

$$P(S) = \frac{area\ S}{area\ AS}$$ رابطه ٦

$$P(B_i) = \frac{area\ B_i}{area\ AS}$$ رابطه ۷

$$P(B_i^{\wedge}) = \frac{area\ B_i^{\wedge}}{area\ AS}$$ رابطه ۸

$$P(S|B_i) = \frac{(area\ S\ AND\ area\ B_i\ /area\ B_i)}{P(B_i)}$$ رابطه ۹

$$P(B_i|s) = \frac{(area\ S\ AND\ area\ B_i\ /area\ B_i)}{P(S)}$$ رابطه ۱۰

$$P(s|B_i^{\wedge}) = \frac{(area\ S\ AND\ area\ B_i^{\wedge}\ /area\ B_i^{\wedge})}{P(B_i^{\wedge})}$$ رابطه ۱۱

$$P(B_i^{\wedge}|s) = \frac{(area\ S\ AND\ area\ B_i^{\wedge}\ /area\ B_i^{\wedge})}{P(S)}$$ رابطه ۱۲

در روش وزن شواهد، وزن کلاس‌های هر پارامتر به‌وسیله ترکیبی از ارزش‌های مثبت و منفی (W^+ و W^-) از طریق تئوری بیز و نیز اختلاف تفاضل بین آن‌ها محاسبه می‌شود و درنهایت با استفاده از رابطه ١٦ وزن نهایی کلاس‌ها حاصل می‌شود.

$$W^+ = LN\left(\frac{P(B_i|s)}{P(B_i)}\right)$$ رابطه ۱۳

$$W^- = LN(P(B_i^{\wedge}|s)/P(B_i^{\wedge}))$$ رابطه ١٤

$$C = W^+ - W^-$$ رابطه ١٥

$$W_{final} = \frac{C}{S_c}$$ رابطه ١٦

در روابط فوق LN لگاریتم بر مبنی عدد نپر، C تفاضل وزن‌های مثبت و منفی، W_{final} وزن نهایی استانداردشده و S_c انحراف استاندارد است که برابر با جذر واریانس هر یک از وزن‌های مثبت و منفی است (پورقاسمی و همکاران، ۱۳۹۱: ۱۱۷). در جدول شماره ۱ اوزان به دست آمد برای هر یک از کلاس‌های پارامترها موردنظر به همراه سایر اطلاعات مربوط به آن آمده است.

جدول ۱ جدول پارامترها و وزن هر یک از کلاس‌ها مأخذ: نگارندگان

Weight	Sc	s2(w-)	s2(w+)	C	w-	w+	class	پارامترها
۱۰/۲۷	۰/۰۲۳	۰/۰۰۰۰۸۸	۰/۰۰۰۴۴	۰/۲۳۷۶	-۰/۰۴۸	۰/۱۸۹	-۶/۵- -۱/۵	شاخص TWI
۱/۳۵	۰/۰۱۹۵	۰/۰۰۰۰۹۹	۰/۰۰۰۲۸	۰/۰۲۶۴	-۰/۰۰۸۷	۰/۰۱۷	-۱/۵- ۲/۹	
۲۷/۴	۰/۰۱۷۸	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۲	۰/۴۸۹	-۰/۱۹۲	۰/۲۹۸	۲/۹- ۴/۹	
۳۴/۳	۰/۰۲۶	۰/۰۰۰۰۸۹	۰/۰۰۰۴۲	۰/۷۷۳	-۰/۱۳۸	۰/۶۳۶	۴/۹-۸/۴	
۱۲/۳	۰/۰۴۴	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۰۰۱۸۸	۰/۵۴۳	-۰/۰۲۰۴	۰/۵۲۳	۸/۴<	
۴۵/۰۲	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۲۱	۰/۸۱۲	-۰/۲۸۹	۰/۵۲۳	۰-۱۶/۷	شاخص STI
۳۰/۷	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۲۲	۰/۵۶۲	-۰/۱۹۹	۰/۳۶۳	۱۶/۷-۳۰/۹	
۱/۵	۰/۰۲۲	۰/۰۰۰۰۹۱	۰/۰۰۰۳۸۹	۰/۰۳۳	-۰/۰۰۷۶	۰/۰۲۵	۳۰/۹-۴۶/۱	
-۷/۵	۰/۰۲۷	۰/۰۰۰۰۸۲	۰/۰۰۰۶۸	-۰/۲۰۸	۰/۰۲۹	-۰/۱۷۸	۴۶/۱-۶۴/۸	
-۱۰/۲	۰/۰۴۹	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۰۰۲۳۵	-۰/۵۰۲	۰/۰۲۳۷	-۰/۴۷۸	۶۴/۸<	
۱۰/۲۱	۰/۰۲۳	۰/۰۰۰۰۸۸	۰/۰۰۰۴۴	۰/۲۳۶	-۰/۰۴۷۸	۰/۱۸۸	-۱۳/۵- -۵/۳	شاخص SPI
۲۰/۹۴	۰/۰۱۹۸	۰/۰۰۰۰۹۸	۰/۰۰۰۲۹	۰/۴۱۵	-۰/۱۲۰۶	۰/۲۹۴	-۵/۳- -۰/۸	
۲۰/۰۶	۰/۰۱۷۶	۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۰۰۱۸	۰/۳۵۲	-۰/۱۵۳	۰/۱۹۹	-۰/۸-۱	
۱۵/۵۷	۰/۰۲۵۴	۰/۰۰۰۰۸۴	۰/۰۰۰۵۶	۰/۳۹۶	-۰/۰۶۲	۰/۳۳۴	۱-۳/۶	
۱۴/۵۹	۰/۰۳۵۱	۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۰۰۱۱۵	۰/۵۱۲	-۰/۰۲۹۷	۰/۴۸۲	۳/۶ <	
۴/۸۴۳	۰/۰۲۱۸	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۳۶	۰/۱۰۵۶	-۰/۰۳۲	۰/۰۷۴	۸۰-۱۰۰	تراکم پوشش گیاهی
۳۶/۴۸	۰/۰۱۹	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۲۴۷	۰/۷۰۵۹	-۰/۲۵	۰/۴۵۴	۱۰۰-۱۲۰	
۲۳/۸۷	۰/۰۲۴	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۵	۰/۵۸۵۵	-۰/۱۰۸	۰/۴۷۷	۱۲۰-۱۴۰	
۲/۷۳	۰/۰۲۰۸	۰/۰۰۰۱۱	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۵۶۹	-۰/۰۱۶۶	۰/۰۴	۱۴۰-۱۷۰	
۲/۶۴	۰/۲۳۵۹	۰/۰۰۰۰۸۴	۰/۰۵۵۵۵	۰/۶۲۲۵	-۰/۰۰۰۶	۰/۶۲۲	۱۷۰-۱۹۹	
-۷/۷۷	۰/۰۱۹	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲۶	-۰/۱۴۹	۰/۰۴۸۸	-۰/۱	۰-۲۰۰	فاصله از گسل
۱۳/۴۵	۰/۰۲۲	۰/۰۰۰۰۹۱	۰/۰۰۰۳۷	۰/۲۹۱	-۰/۰۷۴۲	۰/۲۱۷	۲۰۰-۴۰۰	
۲۸/۴۸	۰/۰۲۳	۰/۰۰۰۰۸۸	۰/۰۰۰۴۴	۰/۶۵۷	-۰/۱۲۸۱	۰/۵۲۹	۴۰۰-۶۰۰	
۲۹/۹۸	۰/۰۲۷	۰/۰۰۰۰۸۳	۰/۰۰۰۶۵	۰/۸۱	-۰/۰۹۷	۰/۷۱۵	۶۰۰-۸۰۰	
۳۰/۱۳	۰/۰۱۹	۰/۰۰۰۰۹۸	۰/۰۰۰۲۹	۰/۵۹۸	-۰/۱۵۱	۰/۴۴۷	۸۰۰ <	
۰/۴۵	۰/۵۷۷	۰/۰۰۰۰۷۳	۰/۳۳۳	۰/۲۶۰۴	-۰/۰۰۰۰۷	۰/۲۶	مسطح	جهت شیب
۴۲/۲۱۵	۰/۰۱۹	۰/۰۰۰۰۹۹	۰/۰۰۰۲۹	۰/۸۲۹۶	-۰/۱۸۸۱	۰/۶۴۱	شمال	
۶/۱۵۶	۰/۰۲۶	۰/۰۰۰۰۸۳	۰/۰۰۰۶	۰/۱۶۴	-۰/۰۲۳۲	۰/۱۴	شمال شرقی	
۵/۹۶	۰/۰۳۱۵	۰/۰۰۰۰۷۹	۰/۰۰۰۹	۰/۱۸۸	-۰/۰۱۶۲	۰/۱۷۱	شرق	
-۱۲/۴۲	۰/۰۵۳	۰/۰۰۰۰۷۵	۰/۰۰۲۷	-۰/۶۶۳۶	۰/۰۳۷۳	-۰/۶۲۶	جنوب شرقی	
-۱۰/۱۴	۰/۰۳۶	۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۰۰۱۲	-۰/۳۶۴۵	۰/۰۳۸	-۰/۳۲۶	جنوب	
۷/۶۰۸	۰/۰۲۵۶	۰/۰۰۰۰۸۴	۰/۰۰۰۵۷	۰/۱۹۵	-۰/۰۳۰۳	۰/۱۶۵	جنوب غربی	
۲۷/۶۹	۰/۰۲۳۸	۰/۰۰۰۰۸۷	۰/۰۰۰۴۷۸	۰/۶۵۸	-۰/۱۲۴۸	۰/۵۳۳	غرب	
۳۱/۰۴۹	۰/۰۲۲۵	۰/۰۰۰۰۸۹	۰/۰۰۰۴۱۸	۰/۶۹۹۱	-۰/۱۳۶	۰/۵۶۳	شمال غرب	

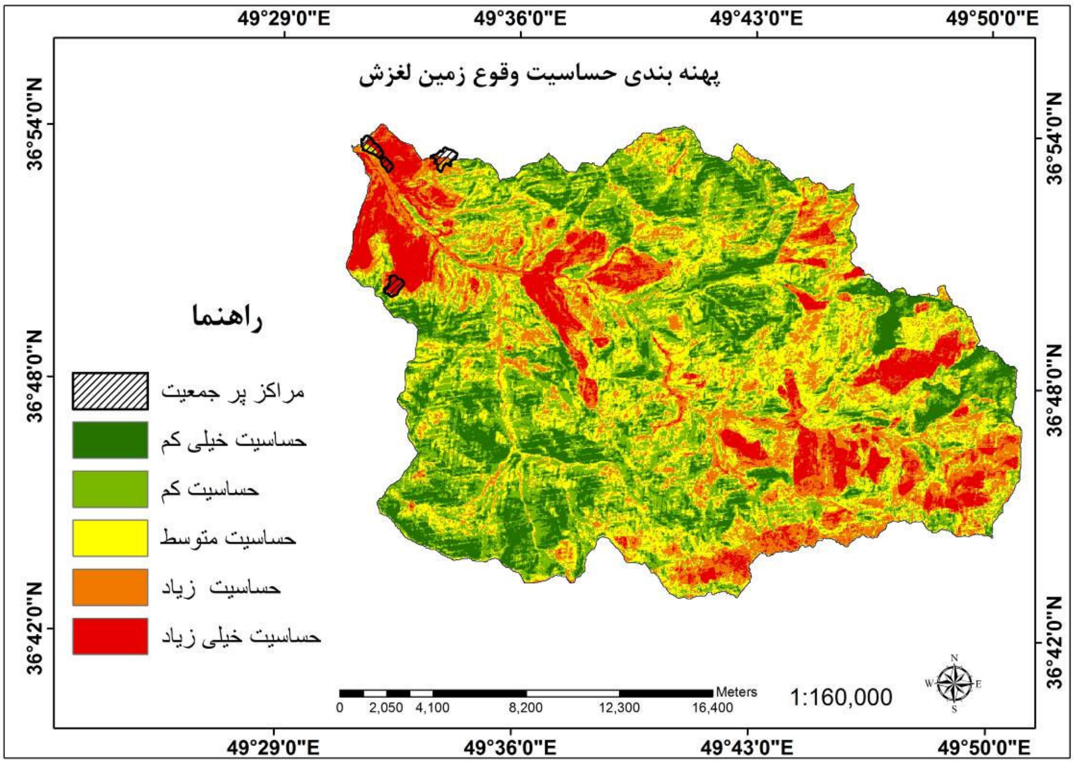
ادامه جدول ۱ جدول پارامترها و وزن هر یک از کلاس‌ها مأخذ: نگارندگان

Weight	Sc	s2(w-)	s2(w+)	C	w-	w+	class	پارامترها
-	-	۰/۰۰۰۰۷	-	-۲/۷۵۶	۰/۰۰۲۲	-۲/۷۵۴	A	نوع سازند
۱۷۹/۸۷	۰/۰۱۷۵	۰/۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۱۲	۳/۱۴۴	-۱/۱۱۳	۲/۰۳۱	B	
۵۳/۸۷	۰/۰۲۸۸	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۷۵	۱/۵۵۱	-۰/۰۸	۱/۴۷۱	C	
-۱۲/۲۱	۰/۲۶۷۴	۰/۰۰۰۰۷۴	۰/۰۷۱۴	-۳/۲۶	۰/۰۳۶۴	-۳/۲۳	D	
-۸/۴	۰/۰۹۷	۰/۰۰۰۰۷۴	۰/۰۰۹۴	-۰/۸۲	۰/۰۲۴۷	-۰/۷۹۵	E	
-۲۲/۰۹	۰/۱۵۶	۰/۰۰۰۰۷۴	۰/۰۲۴۴	-۳/۴۵۶	۰/۰۸۶۳	-۳/۳۶۹	F	
-	-	۰/۰۰۰۰۷۴	-	-	۰/۰۰۳	-	G	
-	-	۰/۰۰۰۰۷	-	-	۰/۰۰۵۵	-	H	
-۴۷/۹۴	۰/۰۳۰۲	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۸	-۱/۴۴۶	۰/۳۴۷۵	-۱/۰۹۸	I	
-۳/۹۷	۰/۱۷۹۸	۰/۰۰۰۰۷۴	۰/۰۳۲	-۰/۷۱۵	۰/۰۰۳۹	-۰/۷۱۱	J	
۴۵/۸	۰/۰۳۰۷	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۰۰۸۶	۱/۴۰۷	-۰/۰۶۶۶	۱/۳۴۱	K	
-۱۳/۰۷	۰/۰۸۵۵	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۷۲	-۱/۱۱۸	۰/۰۴۴۷۸	-۱/۰۷۴	L	
-۱۸/۵	۰/۰۴۹۸	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۰۰۲۴	-۰/۹۲	۰/۰۵۳	-۰/۸۶۷	M	
-۱۹/۶۸	۰/۰۵۸۶	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۳۳	-۱/۱۵۳	۰/۰۴۶	-۱/۱۰۶	N	
۵۸/۷	۰/۰۴۲۳	۰/۰۰۰۰۷۷	۰/۰۰۱۷	۲/۴۸۳	-۰/۰۴۳۷	۲/۴۳۹	O	
-	-	۰/۰۰۰۰۷۳	-	-۴/۴۲	۰/۰۰۶	-۴/۴۱۴	P	
-۱۱/۰۲	۰/۰۸۱۶۲	۰/۰۰۰۰۷۴	۰/۰۰۶۵۸	-۰/۸۹۹	۰/۰۲	-۰/۸۷۸	Q	
-۵/۹	۰/۴۰۸۳۴	۰/۰۰۰۰۷۳	۰/۱۶۶۷	-۲/۴۱۳	۰/۰۲۹	-۲/۳۸۴	R	
-	-	۰/۰۰۰۰۷۳	-	-	۰/۰۰۰۹۹	-	S	
۱۵/۷۸	۰/۰۳۷۲	۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۰۰۱۳	۰/۵۸۶	-۰/۰۳۷	۰/۵۴۹	۰-۵	درجه شیب
۳۸/۵۸	۰/۰۲۰۸	۰/۰۰۰۰۹۴	۰/۰۰۰۳۴	۰/۸۰۵	-۰/۱۸۰۷	۰/۶۲۴	۵-۱۰	
۳۳/۳۹	۰/۰۱۷	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۰۰۱۶	۰/۵۷۵	-۰/۲۷۵۹	۰/۲۹۹	۱۰-۲۰	
-۴/۰۷۶۶	۰/۰۲۱۱	۰/۰۰۰۰۹۳	۰/۰۰۰۳۵	-۰/۰۸۶	۰/۰۲۲۳	-۰/۰۶۴	۲۰-۳۰	
-۱۰/۶۲	۰/۰۳۶۵	۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۰۰۱۲	-۰/۳۸۷۵	۰/۰۳۱۹	-۰/۳۵۵	۳۰-۴۰	
-۵/۶۶۷	۰/۰۸۸۵	۰/۰۰۰۰۷۴	۰/۰۰۷۷	-۰/۵۰۱۳	۰/۰۰۷۰۹	-۰/۴۹۴	< ۴۰	
۳۶/۴۵	۰/۰۱۸	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲۳	۰/۶۷۳	-۰/۲۰۱	۰/۴۷۲	۰-۱۰۰	فاصله از رودخانه
۳۷/۰۹۵	۰/۰۱۸۹	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۲۵	۰/۷	-۰/۲۰۲	۰/۴۹۸	۱۰۰-۲۰۰	
۲۰/۶۵	۰/۰۲۲۶	۰/۰۰۰۰۸۹	۰/۰۰۰۴۲	۰/۴۷	-۰/۰۹۵	۰/۳۷۳	۲۰۰-۳۰۰	
۴/۵۲	۰/۰۲۲۴	۰/۰۰۰۰۸۹	۰/۰۰۰۴۱	۰/۱۰۱	-۰/۰۲۵	۰/۰۷۶	۳۰۰-۵۰۰	
-۱۷/۵	۰/۰۴۲۱	۰/۰۰۰۰۷۷	۰/۰۰۱۷	-۰/۷۳۶	۰/۰۷۵	-۰/۶۶۲	<۵۰۰	

ادامه جدول ۱ جدول پارامترها و وزن هر یک از کلاس‌ها مأخذ: نگارندگان

پارامترها	class	W+	W-	C	s2(w+)	s2(w-)	Sc	Weight
میزان بارش	۶۰۰-۴۹۶	۱/۱۳۱	-۰/۱۷۳	۱/۳۰۴	۰/۰۰۰۴۶۶	۰/۰۰۰۰۸۷	۰/۰۲۳۵	۵۵/۵۶۲۵
	۷۰۰-۶۰۰	۰/۰۵۲	-۰/۰۲۸	۰/۰۸۰۴	۰/۰۰۰۳۲	۰/۰۰۰۰۹۵	۰/۰۲۰۴	۳/۹۳۵
	۸۰۰-۷۰۰	۰/۱۲۳	-۰/۰۹۶	۰/۲۱۹	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۱۷۴	۱۲/۶۱۵
	۹۰۰-۸۰۰	۰/۵۱۴	-۰/۰۸۷	۰/۶۰۰۹	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۸۶	۰/۰۲۴۲	۲۴/۸۱
	۹۰۰ <	۰/۰۷۷	-۰/۰۰۵۷	۰/۰۸۲۹	۰/۰۰۱	۰/۰۰۰۰۷۷	۰/۰۴۱	۲/۰۲۲
کاربری زمین	باغ	۰/۳۶۹	-۰/۰۰۲۳	۰/۳۷۱	۰/۳۳	۰/۰۰۰۰۷	۰/۵۷۷	۰/۶۴
	جنگل متراکم	-۰/۰۱۱	۰/۰۰۷۴	-۰/۰۱۸۹	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱۸	-۱/۰۵
	جنگل تنک	۰/۵۳۹	-۰/۰۶۷۶	۰/۶۰۷	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰۸	۰/۰۲۶	۲۳/۴
	کشاورزی-باغ	-۰/۵۷۴	۰/۰۰۴۵	-۰/۵۷۸	۰/۰۵۵	۰/۰۰۰۰۷۴	۰/۲۳۵۸	-۲/۴۵
	لم یزرع	-۱/۶۲۷	۰/۰۲۳	-۱/۶۵	۰/۰۱۲۵	۰/۰۰۰۰۷۴	۰/۱۱۲	-۱۴/۷۲
	مرتع خوب	۲/۷۱۸	-۰/۰۴۲۹	۲/۷۶	۰/۰۰۱۷	۰/۰۰۰۰۷۷	۰/۰۴	۶۶/۱۸
	جنگل تنک(مختلط)	-۰/۶۵	۰/۰۱۱	-۰/۶۶	۰/۰۰۹۲	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۹۶	-۶/۸۷
	جنگل متوسط(مختلط)	۰/۱۱	-۰/۰۰۱۶	۰/۱۱	۰/۰۰۴۹	۰/۰۰۰۰۷۵	۰/۰۷۱	۱/۵۷
	مرتع متوسط(مختلط)	۰/۴۶۲	-۰/۳۶۷	۰/۸۳	۰/۰۰۰۱۸	۰/۰۰۰۱۲	۰/۰۱۷۴	۴۷/۵۲
	جنگل درختچه ای	۰/۰۶۲	-۰/۰۰۳۷	۰/۰۶۶	۰/۰۰۲۱	۰/۰۰۰۰۷۶	۰/۰۴۶۴	۱/۴۲
	جنگل متوسط	۰/۰۷۳۸	-۰/۰۰۰۶۴	۰/۰۷	۰/۰۰۸	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۸۹	۰/۸۳
	مرتع متوسط		۰/۰۰۰۸۱	-	-	۰/۰۰۰۰۷	-	-
	مرتع فقیر	-۱/۴۳۸	۰/۰۲۳	-۱/۴۶	-	۰/۰۰۰۰۷	-	-
	شهری	-	۰/۰۰۱۲		-	۰/۰۰۰۰۷	-	-
درجه شیب	۵-۰	۰/۵۴۹	-۰/۰۳۷	۰/۵۸۶	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۰۳۷۲	۱۵/۷۸
	۱۰-۵	۰/۶۲۴	-۰/۱۸۰۷	۰/۸۰۵	۰/۰۰۰۳۴	۰/۰۰۰۰۹۴	۰/۰۲۰۸	۳۸/۵۸
	۲۰-۱۰	۰/۲۹۹	-۰/۲۷۵۹	۰/۵۷۵	۰/۰۰۰۱۶	۰/۰۰۰۱۳	۰/۰۱۷	۳۳/۳۹
	۳۰-۲۰	-۰/۰۶۴	۰/۰۲۲۳	-۰/۰۸۶	۰/۰۰۰۳۵	۰/۰۰۰۰۹۳	۰/۰۲۱۱	-۴/۰۷۶۶
	۴۰-۳۰	-۰/۳۵۵	۰/۰۳۱۹	-۰/۳۸۷۵	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰۷۸	۰/۰۳۶۵	-۱۰/۶۲
	۴۰ <	-۰/۴۹۴	۰/۰۰۷۰۹	-۰/۵۰۱۳	۰/۰۰۷۷	۰/۰۰۰۰۷۴	۰/۰۸۸۵	-۵/۶۶۷

پس‌ازاینکه وزن هر یک از کلاس‌های پارامترهای در نظر گرفته‌شده به دست آمد، در محیط نرم‌افزار Arc map وزن مربوط به هر کلاس اعمال شد و با روی‌هم گذاری پارامترها نقشه نهایی برای حساسیت زمین‌لغزش به دست آمد. با استفاده از روش شکستگی‌های طبیعی[1] نقشه به‌دست‌آمده در ۵ کلاس حساسیت وقوع زمین‌لغزش دسته‌بندی شد (شکل ۱۴).



شکل ۱۴ نقشه پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش در حوضه رودخانه سیاهرود

۴. بحث و نتایج

با توجه به نقشه تهیه شده و اطلاعات جدول یک در لایه نوع سازند، کلاس B (تراس‌های آبرفتی قدیمی و مخروط افکنه‌های مرتفع) بیشترین تأثیر و وزن را به خود اختصاص داده است. تناوب توف داسیتی-اندزیتی با میان لایه‌ای از ماسه‌سنگ و کنگلومرا در رده بعدی قرار دارد. همچنین سازندهای سنگ آهک و کنگلومرا در بین سایر لایه‌های سنگ‌شناسی کمترین وزن و اثر را در ایجاد زمین‌لغزش‌های منطقه داشته‌اند. در بین کلاس‌های مختلف کاربری زمین، مرتع متوسط با بیشترین وزن بیشترین تأثیر را در رخ داد زمین‌لغزش‌های منطقه داشته است که می‌تواند در رابطه با تمرکز فعالیت‌های انسانی و مراکز جمعیتی در این

1 Natural breaks

مناطق باشد. در بین جهت‌های مختلف شیب، جهات شمالی و شمال غربی بیشترین و جهات جنوبی و جنوب‌شرقی کم‌ترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارند. همچنین شیب‌های ۱۰–۵ و ۲۰–۱۰ به ترتیب بیشترین تأثیر و وزن را در وقوع زمین لغزش دارا می‌باشند. در لایه فاصله از رودخانه نیز کلاس ۱۰۰–۰ متر بیشترین تأثیر را در وقوع زمین‌لغزش دارند.

برای اینکه بتوانیم مدل اجراشده در منطقه را مورد ارزیابی قرار دهیم با استفاده از روش وزن شواهد و یک سوم زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه (۳۰ زمین‌لغزش) که در اجرای مدل استفاده‌نشده بودند، پراکنش فضایی لغزش‌ها در کلاس‌های پنج‌گانه نقشه حساسیت زمین‌لغزش مورد ارزیابی آماری قرار گرفت که نتایج آن در جدول شماره ۲ ارائه‌شده است.

جدول ۲ مساحت کلاس‌های پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش و درصد زمین‌لغزه‌های رخ داده

کلاس حساسیت	مساحت هر کلاس به درصد	مساحت زمین‌لغزش‌های رخ داده به درصد
حساسیت خیلی کم	۱۵/۵	۱/۷
حساسیت کم	۲۶/۹	۵/۷
حساسیت متوسط	۲۸/۲	۹/۳
حساسیت زیاد	۱۸/۹	۲٤/۳
حساسیت خیلی زیاد	۱۰/۵	۵۹

با توجه به نتایج ارزیابی بیشترین مقدار زمین‌لغزش‌ها در کلاس پنج رخ داده است. طبق اطلاعات جدول با افزایش کلاس خطر تراکم زمین‌لغزش‌ها در آن کلاس افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که کلاس با حساسیت خیلی زیاد حدود ۵۹ درصد زمین‌لغزش‌ها را در خود جای‌داده است. این در حالی است که مساحت این کلاس نسبت به کل منطقه موردمطالعه تنها ۱۰/۵ درصد است. کلاس‌های با حساسیت خیلی کم، کم و حساسیت متوسط با اینکه حدود ۷۱ درصد مساحت منطقه را شامل می‌شوند، اما تنها بخش ناچیزی از زمین‌لغزش‌های رخ داده (۱٦/۷ درصد) در این کلاس‌ها واقع‌شده‌اند. این در حالی است که مابقی لغزش‌های رخ داده در منطقه، یعنی ۸۳/۳ درصد آن‌ها در کلاس‌های چهارم و پنجم نقشه پهنه‌بندی (پهنه با حساسیت زیاد و خیلی زیاد) واقع‌شده‌اند.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از تئوری بیز و ۱۱ پارامتر در نظر گرفته‌شده عمل پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش در حوضه آبریز سیاهرود انجام شد و نتیجه کار به‌صورت یک نقشه پهنه‌بندی شده در پنج کلاس حساسیت ارائه گردید. طبق نقشه پهنه‌بندی ۱۰/۵درصد منطقه در کلاس با پهنه حساسیت خیلی زیاد، ۱۸/۹

درصد در کلاس با حساست زیاد،۲۸/۲ درصد در کلاس بـا حـساسیت متوسـط، ۲٦/۹ درصـد در کـلاس بـا حساسیت کم و ۱۵/۵ درصد نیز در کلاس با حساسیت خیلی کم قرارگرفته‌اند. مناطق با خطـر زیـاد و خیلـی زیاد به‌طور عمده در قسمت خروجی حوضه (غرب حوضه)، بخش مرکزی و جنوب شرقی آن واقع‌شده‌انـد. بخش جنوب غربی حوضه بیشتر به‌صورت پهنه‌های با حساسیت کم و خیلی کم پهنه‌بندی شده اسـت و تنهـا در مناطق حاشیه‌ای رودخانه‌ها می‌توان مناطقی با حساسیت زیاد مشاهده کرد. پس از بـه دسـت آمـدن نقـشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش با استفاده از یک سوم زمین‌لغزش‌های رخ داده در منطقه، نقشه تهیه‌شده از نظـر صـحت و دقت مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی نشان داد که مدل مورداستفاده در پژوهش با قابلیت پیش‌بینـی ۸۳/۳ درصد زمین‌لغزش‌های رخ‌داده در منطقه در کلاس‌های چهارم و پنجم نقشه پهنه‌بندی توانایی مناسبی را برای انجام پهنه‌بندی زمین‌لغزش و پیش‌بینی آن دارد.

روی‌هم گذاری مراکز جمعیتی مهم منطقه مثل شهر توتکابن، گاوخـسب و خاصـه کـول بـا نقـشه نهـایی (شکل ١٤) نشان می‌دهد که این مناطق عمدتاً در پهنه‌هایی با حساسیت زیـاد و خیلـی زیـاد واقـع‌شـده‌انـد و وقوع زمین لغزه گاوخسب در سال ۱۳٦۹ تأییدی بر این امر است و لازم است تـصمیم‌گیـران و برنامـه‌ریـزان محیطی در آینده توجه ویژه‌ای به این امر داشته باشند.

کتابنامه

امیر احمدی، ابوالقاسم؛ کامرانی دلیر، حمید؛ صادقی، محسن؛ ۱۳۸۹. پهنه‌بندی خطر زمـین‌لغـزش بـا اسـتفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، مطالعه موردی حوضه آبخیز چلاو آمل. فصلنامه علمی پژوهشی انجمن جغرافیـای ایران، شماره ۲۷. صص۲۰۳-۱۸۱.

پورقاسمی، حمیدرضا؛ مرادی، حمیدرضا؛ محمدی، مجید؛ مصطفی‌زاده رئوف، گلی جیرنـده؛ ۱۳۹۱. پهنـه‌بنـدی خطـر زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب‌وخاک. سال شانزدهم شماره شصت و دوم. صص ۱۲۱-۱۰۹.

حسین زاده، محمدمهدی؛ ثروتی محمدرضا؛ منصوری عادل؛ میرباقری بابک؛ خضری سعید؛ ۱۳۸۸. پهنه‌بنـدی ریـسک وقوع حرکات توده‌ای با استفاده از مدل رگرسیون لجستیک. فصلنامه زمین‌شناسی ایران. سال سوم شـماره یـازدهم. صفحات ۲۷-۳۷.

قرهی، حمیدرضا. بهلولی، بهمن؛ سیار، امیر؛ شریعت جعفری، محسن؛ ۱۳۹۰. تهیه نقشه حساسیت پدیده زمـین‌لغـزش با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی و مدل آماری دومتغیره در مخزن سد البرز. مجله علوم زمـین، پـاییز ۱۳۹۰ سـال ۲۱ شماره ۸۱، صفحات ۹۳-۱۰۰.

نیازی، یعقوب؛ اختصاصی، محمدرضا؛ طالبی، علی؛ آرخی، صالح؛ مختاری، محمدحسین؛ ۱۳۸۹. ارزیابی کارایی مدل آماری دومتغیره در پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش در حوضه سد ایلام. مجله علوم مهندسی آبخیزداری ایران. سال ٤ شماره ۱۰. صص ۲۰-۹.

یمانی، مجتبی؛ احمدآبادی، علی؛ زارع، غلامرضا؛۱۳۹۱. ارزیابی کارایی فنون هوش مصنوعی در مطالعات زمین‌لغزش با تأکید بر الگوریتم SVM (مطالعه موردی: حوضه آبریز درکه). فصلنامه جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال ۱، شماره ۳.

Amirahmadi, A.a.gh., kamranidalir, H., sadeghi, M., 2011. Landslide hazard zonation. through hierarchical analysis method (ahp). Case Study: chelav basin. Geography 2. 182 - 203.

Barbieri, G., Cambuli, P., 2009. The weight of evidence statistical method in landslide susceptibility mapping of the Rio Pardu Valley (Sardinia, Italy). In: Anderssen, R.S., Braddock, R.D., Newham, L.T.H. (Eds.), 18th World IMACS Congress and MODSIM09 International Congress on Modelling and Simulation. Modelling and Simulation Society of Australia and NewZealand and International Association for Mathematics and Computers in Simulation. 2658–2664.

BonhamCarter, G.F., Agterberg, F.P., Wright, D.F., 1989. Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential. In: Agterberg, F.P., Bonham-Carter. G.F. (Eds.). Statistical applications in the Earth Sciences: Geological Survey of Canada 89. 171–183.

Bonham-Carter, G.F., Agterberg, F.P. and Wright, D.F., 1988. Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia. Photogrammetry and Remote Sensing 54, 1585-1592.

Denison, D.G.T., Holmes, C.C., Mallick, B.K., Smith, A.F.M., 2002. Bayesian methods for nonlinear classification and regression. John Wiley & Sons, Chichester, west Sussex.

Gharahi h., bohlooli b., sayyar a., shariat jafari m., 2011. Landslide susceptibility mapping in the reservoir of alborz dam using analytical hierarchy process and bivariate statistics. Geosciences 81. 93 - 100.

Gorum, T., Gonencgil, B., Gokceoglu, C., Nefeslioglu, H.A., 2008. Implementation of reconstructed geomorpholog icunitsin landslide susceptibility mapping: the Melen Gorge (NWTurkey). Natural Hazards 46, 323–351.

Grabs, T., Seibert, J., Laudon, H., 2007. Modelling spatial patterns of saturated areas: a comparison of the topographic wetness index and a distributed model. Journal of Hydrology 373. 15-23.

Guzzetti, F., 2005. Landslide hazard and risk assessment. Ph. D Dissertation. Bonn.

Hosenzadeh. M.m., servatie. M.r., mansurie. A., mirbagherie. B., khezrie. S., 2009. Zoning risk of mass movements using a logistic regression model. Journal of Geology 11. 27 - 37.

Mathew, J., Jha, V.K., Rawat, G.S., 2007. Weights of evidence modeling for landslide hazard zonation mapping in part of Bhagirathi valley, Uttarakhand. Current Science 92, 628-638.

Mohammadi, M., Pourghasemi, H.R., Pradhan, B., 2012. Landslide susceptibility mapping at Golestan Province, Iran: Acomparison Between frequency ratio, Dempster–Shafer, and weights-of-evidence models, Journal of Asian Earth Sciences 61, 221–236.

Moore, I.D., Burch, G.J., 1986. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: application of unit stream power theory.Water Resource 22, 1350–1360.

Neaupane K.M., Piantanakulchai, M.2006: Analytic network process model for landslide hazard zonation, Engineering Geology 85, 281–294.

Nefeslioglu, H.A., Duman, T.Y., Duemaz, S., 2008. Landslide susceptibility mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). Geomorphology 94, 401–418.

Niyazi. Y., ekhtesasie. M.r., talebi. A., saleh. a., mokhtarei. m.h., 2010. Assess the performance of the bivariate statistical model predicts landslide in Ilam dam basin. Journal of Engineering Science Watershed 10, 9 - 20.

Piacentinia, D., Troiani, F., Soldati, M., Notarnicola, C., Savelli, D., Schneiderbauer, S., Strada, C., 2012. Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (south-eastern Alps, Italy), Geomorphology 151, 196–206.

Poli, S., Sterlacchini, S., 2007. Landslide representation strategies in susceptibility Studies using weights-of-evidence modeling technique. Natural Resources Research, vol (16), 121–134.

Pourghasemi. H. R., Moradi, h. R., Mohammdi, m., Mostafazadeh, r., Goli jirandeh. a., 2013. Landslide hazard zoning using bayesian theory. Jwss - Isfahan University of technology 62, 109-120.

Sanwei, H., Peng, P., Lan, D., Haijun, W., Jiping, L., 2012. Application of kernel based Fisher discriminant analys is to map landslide Susceptibility in the Qinggan River delta, Three Gorges, China, Geomorphology 171, 30–41.

Schmidt, F., Persson, A., 2003. Comparison of DEM data capture and topographic wetness indices. Precision Agriculture vol (4), pp. 179–192.

Sorensen, R., Zinko, U., Seibert, J., 2006. On the calculation of the topographic wetnessindex: evaluation of different methods based on field observations. Hydrology and Earth System Sciences Discussions 2, 1807–1834.

Van Westen, C.J., 2002. Use of weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping. International Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC), Enschede, the Netherlands.

Wilson, J.P., Gallant, J.C., 2000, Digital terrain analysis. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.), Terrain Analysis. John Wiley & Sons, NewYork, 1–27.

Yamani, M., Ahmadabadi, A., Zare, gh., 2012. The Zonation of landslide occurrence Using of Support Vector Machines algorithm (Case Study: Darakeh Basin), Geography and Environmental Hazards 3, 125 - 142.